



TITLE:

地球の原始状態 : 地球熱学の立場から(<特集>地球及び惑星の内部構造について,研究会報告)

AUTHOR(S):

上田, 誠也

CITATION:

上田, 誠也. 地球の原始状態 : 地球熱学の立場から(<特集>地球及び惑星の内部構造について,研究会報告). 物性研究 1966, 7(1): 93-115

ISSUE DATE:

1966-10-20

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/85933>

RIGHT:

地球の原始状態

—地球熱学の立場から—

上 田 誠 也 (東大理地球物理)

I Introduction

先ず、現在の地球に関して知られていることのうち、関係深いものを簡単に review する。考えられる原始状態は、結局、**現在の地球**を説明し得るものでなければならない。

基本的な量は、以下の通りである。

地球半径 = 6 3 7 0 km
地球質量 = 5.98×10^{27} gr
平均密度 = 5.529 g/cm^3 , 表面密度 = 3.32 g/cm^3

慣性能率 = 6.77×10^{44} c. g. s.

中心圧力 = 3 6 0 万気圧

地球が現在と同じようになってからの年令 = 4.5×10^9 年

2 地球の構造

地球についての知識は近年甚しく増大した。それは、人口衛星、長周期地球振動等の観測、高温高圧実験、地磁気ダイナモ理論、古地磁気学等の研究成果によるのであるが、内部の熱的状态の解明は遅れている。

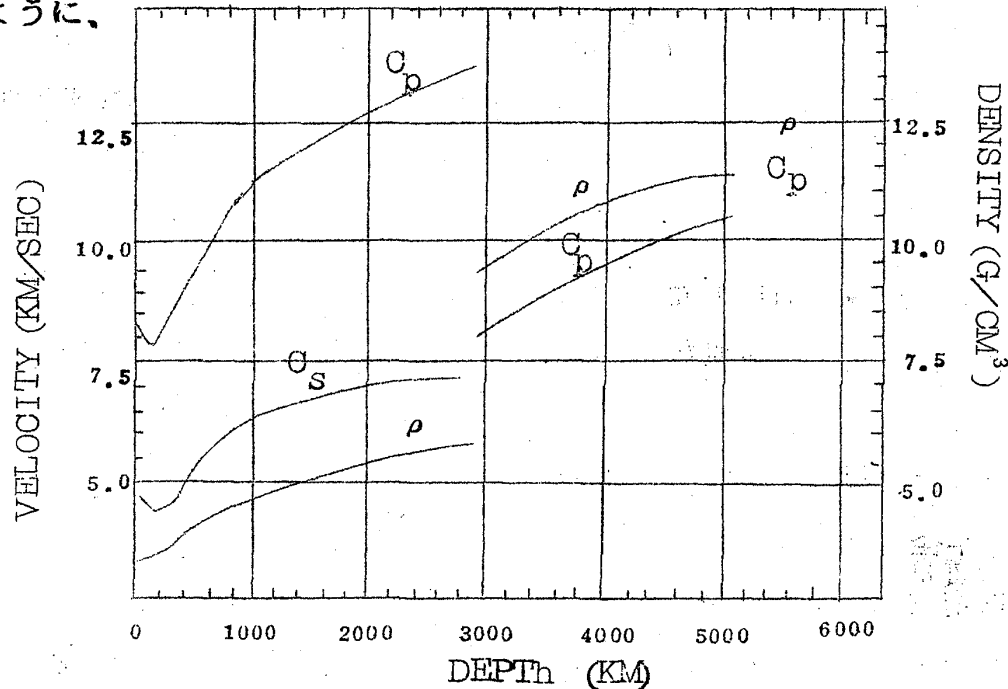
人口衛星の軌道観測の結果によると、現在の地球は、現在の自軸速度にふさわしい静水圧平衡形の扁平度 ($\epsilon = \frac{1}{299.8 \pm 0.3}$) よりも大きい扁平度 ($\epsilon = \frac{1}{298.2}$) をもっている。現在の地球自転速度の減少 rate を extrapolate すると、現在の地球の形は、 10^7 年前の自転速度にふさわしいことになる。仮に、この非平衡が粘性によるものとする、粘性率は $\mu \sim 10^{26}$ c. g. s., 強度によるものとする、強度は 200 bar 程度になる。いずれにしても、地球は全体としては**かたい**ことになる。

更に時間スケールの小さい力に対する地球の response は、地球潮汐や、自

上田誠也

由章動とかからも得られるが、essential には地震波の研究から得られる。

地球が成層構造をもっていることは疑う余地がない。それは、よく知られているように、



第1図 地球内部の縦波速度 (C_p)、横波速度 (C_s)、及び密度 ρ 分布 (Gutenberg による)

第1図のような速度分布の示す通りである。即ち、
地殻 : 大陸で略35 km、大洋で略5 km の厚さ。主に花崗岩質、
及び玄武岩質の岩石からなる。海洋地殻では花崗岩質を欠く。
厚さは小さすぎて、第1図にはかかれていない。

M不連続面 : 地殻マントルの境界、1~2 km 程度の深さの巾以内に、
縦波速度が7.2km/sec から8.2km/sec に変化する。(モホロビチツナ不連続面の略称)。

マントル : 地下2900kmまでを占める固体部分。すくなくとも上部マ
ントルについては、地震波速度からみて、peridotite のよ
うな、超塩基性岩 (Mg や Fe の珪酸塩) 或は、eclogite
(玄武岩の高圧相) がその構成物質であると思われる。

深さ100~200km の shell では、深さと共に、地震波速度が
減少(数パーセント)しており(低速度層) 温度が融点に近い
可能性がある。深さ400~1000km では、密度や速度の上昇が
急であり、homogeneous 物質の圧縮だけでは、説明できず、

地球の原始状態

相変化又は、成分変化が考えられる(C-層)。olivine \leftrightarrow spinel 変化は相変化の一つの有力な可能性である。電気伝導度もC-層で急増する、(10^{-1} Mho/m \rightarrow 100 Mho/m 程度)。C-層以深は、homogeneous 圧縮の考えと矛盾はしないが、種々の相変化の可能性もある。

核 : 液相。Fe-Ni合金から成ると考えられるが、その密度 ρ は、shock wave 実験等から推定されるFeの ρ よりも 2g/cm^3 程度小さい。そこでSiが15~20%入っていると考えることができるが、それは、高圧実験結果(Kormer and Funtikov, 1965), chondrite model 及び、地磁気ダイナモ理論を必要とする電気伝導度等と折合いがよい。

内核 : 深さ5100km以深は速度、密度共に僅かながら急増するので、核物質が固化状態になっていると考えられる。若しそうなら、核と内核の境界での温度は、核構成物質の融点と等しいはずである。

3. 地球磁場

地球磁場は現在、回転軸を 11.4° 程傾いた双極子型磁場と、これに重ね合された非双極子磁場からなっている。磁場の原因が地球核内にあることは確実である。磁場発生の機構としては、流体核内の自己励起的ダイナモが現在一般に受け入れられている。但し、ダイナモの原動力としては、核内の熱対流、或は、マントル及び核に対するprecessional torqueの差(Malkus, 1963)等が提案されているが、確実ではない。特に、熱対流の場合、十分な熱源が核内に存在するか否かは、疑問である。内核の固化による潜熱放出がenergy源であるという考えもある(Verhoogen, 1960)。

双極子磁場は、過去数千万年間は確実に存在し、且その軸は、長時間平均($T \geq 10^4$ 年)としては、現在の回転軸と一致していた。このことは、岩石の残留磁気を調べる古地気学(paleomagnetism)からの結論である。地球磁場自

上田誠也

体の存在は、過去数億年については、ほぼ確実であるが、それが双極子的であつたと仮定すれば、大規模な極の移動があつたこと、及び、過去 2~3 億年の間に大規模な大陸移動もあつたことになる。地球磁場の極性は一定ではなく、しばしば反転があつた。過去 4 百万年については、詳しい研究 (Cox et al, 1964) があり、第 2 図に示すように、ほぼ 10^6 年の order の周期をもつて反転が行われた。このように、核内のダイナモは、一種の交流発電機であるとみることが出来るが、その理論は、現在、いろいろの試みが行われている段階である。いずにしても、一般に惑星に磁場が存在すれば、電導性流体核の存在を意味することになる (但し、逆は必ずしも真ならず)。流体金属核が存在し、且、磁場の存在しない場合には、核内に熱対流が存在しないか、或は自転速度が小さいかを示すのかもしれない。運動の原因が precessional torque を与える程の衛星が存在しない場合も磁場は生れないであろう。

4 地殻熱流量

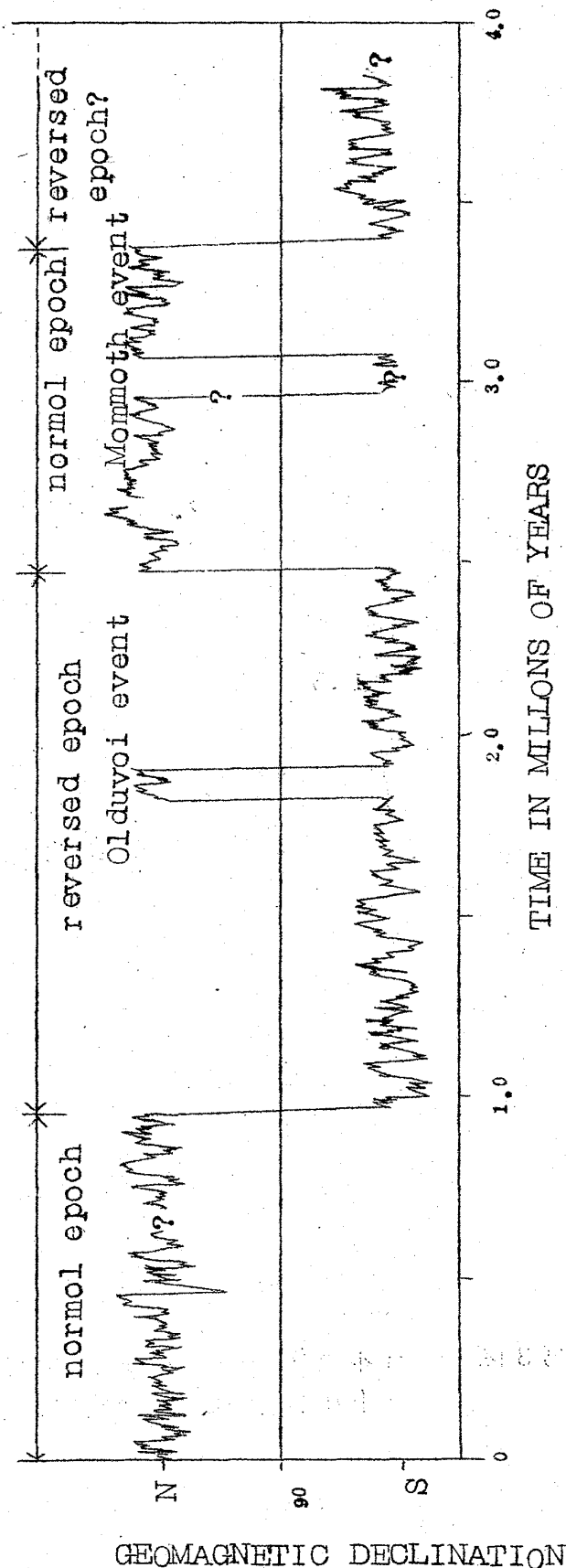
地球内部から流出する熱量 Q (Lee and Uyeda, 1965) は、世界的平均が $1.5 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ sec} \pm 10\%$ である。 Q は、大陸でも大洋でも平均的には略同じである。勿論、 Q は場所によつて異なるが、それはその場所の地史と関係が深い。造山作用の活発な大陸と海洋の境介地域 (日本等) では、 Q の分布は甚だ複雑である (第 3 図)。

地球全体からみるならば、大陸での平均的 Q と、大洋での平均的 Q とが等しいということが重大である。即ち、大陸地域の Q は、大陸地殻中の放射性発熱によつてその略 80% が説明されるが、大洋地殻はその 10% しかまかなえない。このことは、大洋下のマントルと大陸下のマントルの放射性元素含有量が大きく異なることを要求する (第 4 図)。このことは、マントルや地殻発達の歴史に重大な制限を加える。

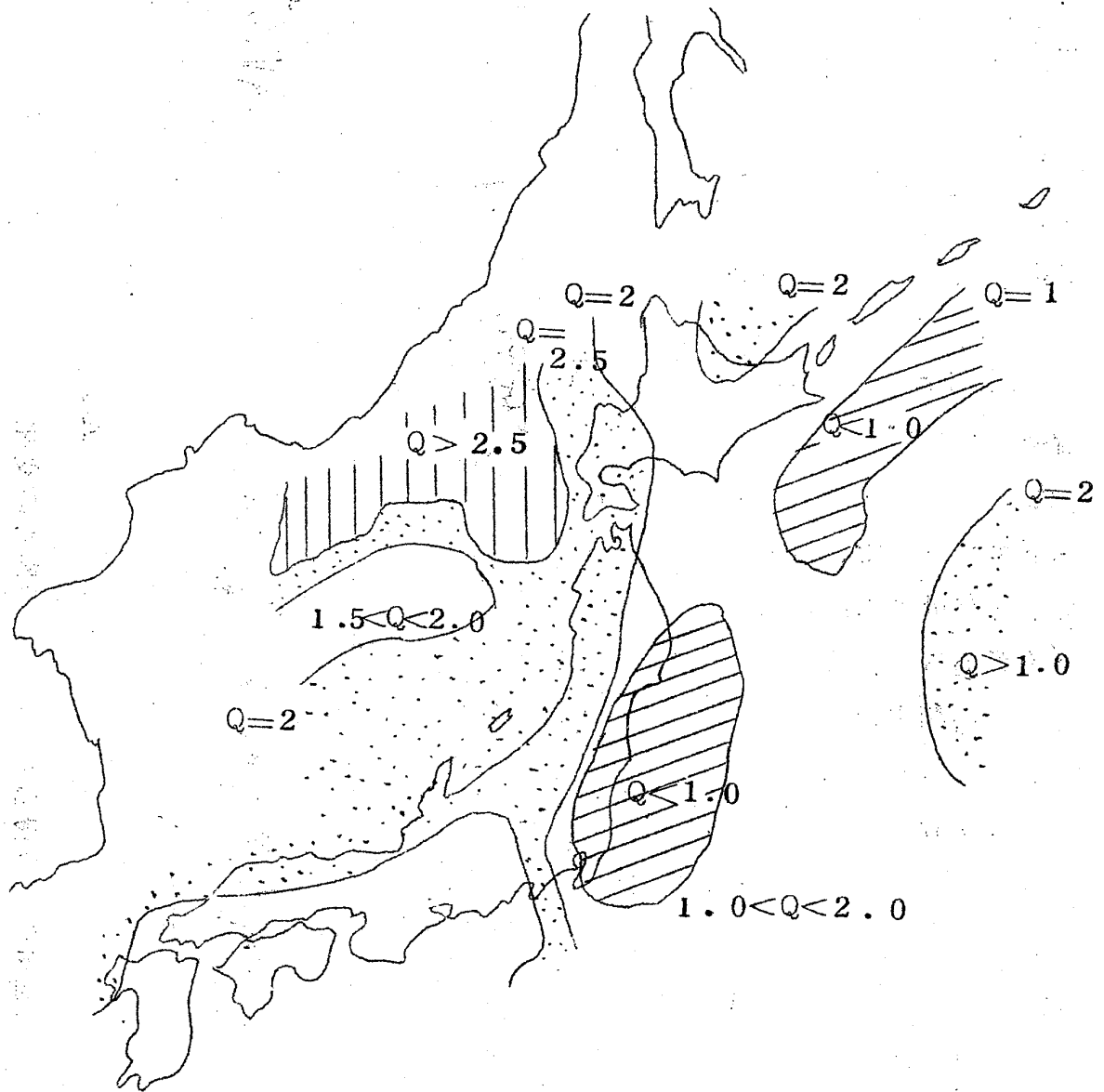
上の事実は、海洋下では、熱源が、主にマントル内に散布していることを意味する。この場合、簡単な考察から海洋下のマントルは、大陸下のマントルに比べ、高温であることが期待され、海洋下マントルは、大きな熱伝達機構を仮定しない限り、熔融してしまうことになる。海洋下マントルの熔融を避けるた

めには、熱伝導度 K から $0.02 \text{ Cal/cm sec deg}$ 程でなければならない。これは、常温での超塩基性岩の K より、略一桁大きい。このために、高温での輻射熱伝導度の寄与や、熱対流による effective K の増大が指摘されている。

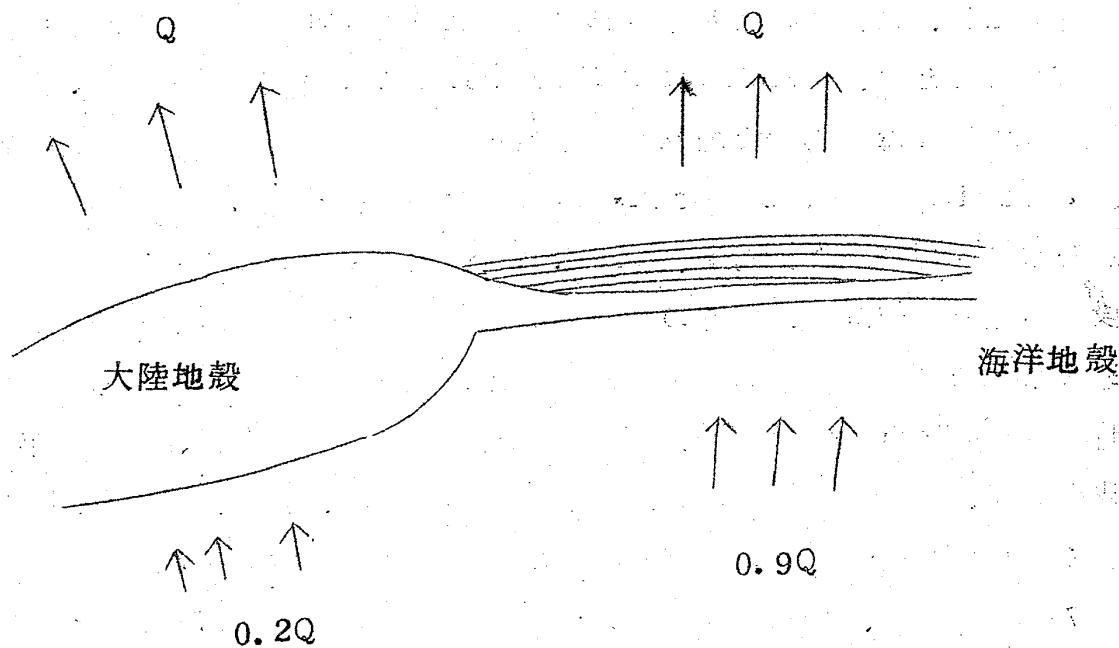
海洋下マントルと、大陸下マントルで、放射性元素含有量に本当に大きい差があるか、否かについて直接測定の結果はない。マントル物質の放射性元素含有量の決定は一つの大きな急務であろう。超塩基性岩について、現在迄になされた放射性元素含有量の決定は、試料に、bias があるかもしれない。この問題については、本研究会を契機にして、学習院大学大学グループとの協同研究が緒につきそうであり、その結果は興味深い。



第二図 古地磁気等から得られた地球磁場極性の変化
左端は現在 (Coxらによる。)



第3図 日本近傍の地殻熱流量分布：単位： 10^{-6} cal/cm² sec.
(上田、宝来、及び安井、渡部による)。



第4図 海洋下マントルは多量の熱源を含まねばならない。

5 History of the thermal history

地球の熱的歴史の研究はLord Kelvinあたりにさかのぼるが、その頃のモデルは著しく簡単で、現実的ではなかった。近年、高速計算機の発達に伴って次第に現実に近いものが、取扱われるようになった。

一般に温度場を規定する式は、

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho(T, P, C)C(T, P, C)} [\nabla \cdot (K(T, P, C) \nabla T) + A(T, P, C) - \nabla \cdot \mathbf{v} T] \quad (1)$$

とかける。T及び速度場 \mathbf{v} は場所(r)と時間(t)の関数であるが、間接的にrとtに支配される。Aは、放射性熱源、化学反応、相変化、potential Energyの熱への変換等による発熱量、吸熱量をすべて含む。Aもr.tの関数である。

この基本式に適当な初期条件、境界条件を与えて解くことが、thermal historyの方法である。

Lord Kelvinの場合には、半無限固体地球を考え、 ρ, C, K は常数、 $A = \mathbf{v} = 0$ とした。そしてT(r, t)について、 $T(0, t) = 0$,

上田誠也

$T(r, 0) = \text{一定} = \text{融点}$ としたのである。これでは、どうにも簡単すぎる。

地球を球形にし、且、その後発見された放射性熱源 (time independent) と考慮に入れることは、JeffreysやSlichterらによつて行われたが、その思想は当時 orthodoxであつた地球高温起源説にのつとつていた。このため、主眼は、*•Cooling of the earth•* の研究であり、 $T(r, 0)$ としては、常に融点分布が採用された。勿論、 $\rho \cdot C \cdot K$ は常数 $v = 0$ であつた。

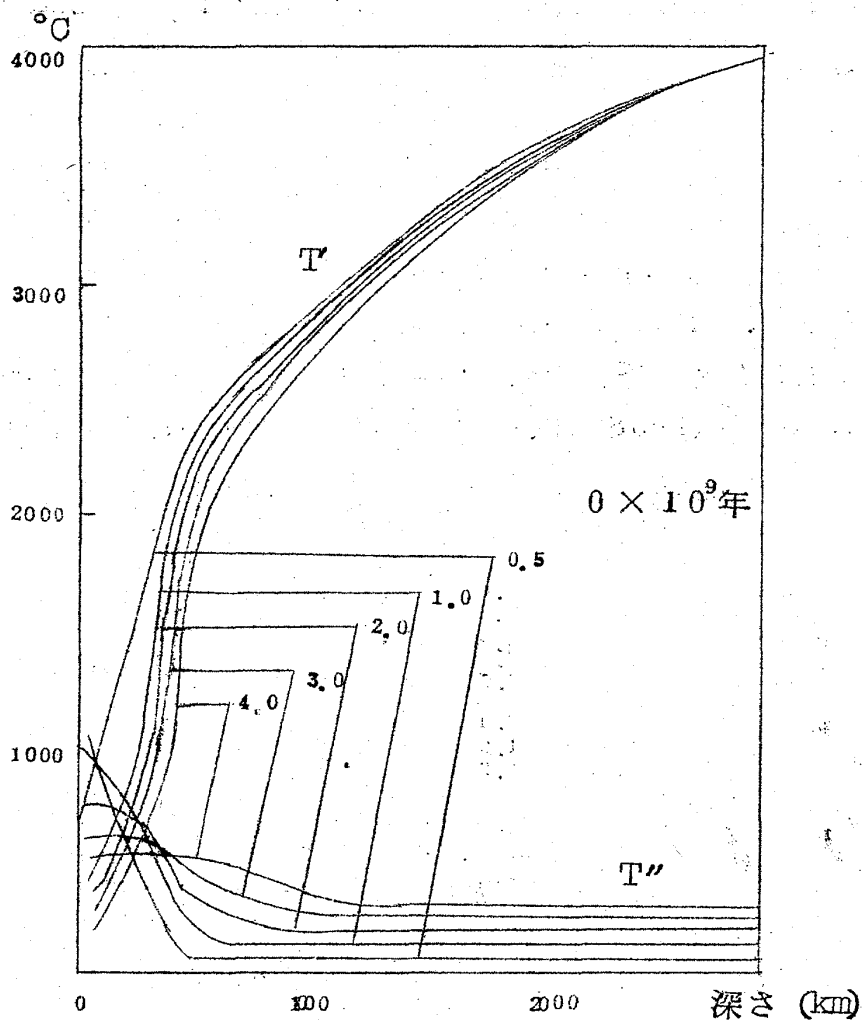
この^階段での主要な結論は、地球のサイズが大きいこと及び K が小さいことから見て地球全体の Cooling は甚しくおそいということであつた。地球としての熱的時定数 $t \sim a^2 / \kappa \pi^2$ (a は半径, $\kappa = \frac{K}{\rho \cdot C}$) $10^{11} \sim 10^{12}$ 年に達する。即ち、地球の年令程度の時間では、地球内部の冷却は、ほとんど起り得ず、更に、その上、熱源が存在していれば尚更冷えにくいことになるのである。

1957年になつて、Jacobs and Allan (Jacobs, 1957) が A を time dependent として、大規模な計算 (第5図) を行つた際にも、このことが強調された。こうして、かつて地球が全面的にとけたとすると、現在程度まで冷えることはあり得ないのではないか、という思想が、ひろまつた。高温起源説をとり、最初、とけていた地球を想定すれば、地球の成層構造の形成を説明するのは、極めて容易であるにも拘らず、これらの計算はかえつて、高温起源説を否定する根拠となつた。

一方、地球の低温起源説は、Schmidt, Urey等によつて推進されており、低温起源説にもとづく、thermal history の検討は当然要求されることになつた。Urry (1949) は地球の始源物資が隕石と同程度の放射性元素を含んでたと仮定し、放射性元素の量は時間をさかのぼると共に、exponential に増大することを考慮すると低温から出発した地球でも、現在推定されている温度位までは、暖まり得ることを示した。仮定のとり方如何によつては、低温から出発した地球が融解することすら可能であることになつた。

6 Modern History of the Thermal history

1950年頃から、前節(1)式のうちの諸量について、いくつかの情報が出かかつてきた。そのうち、顕著なのは K についてである。 K には、固体共通の



第5図 Jacobs 及びAllan による thermal history.

T : non-radioactive 地球の cooling.

T'' : radioactive 地球の heating.

数値は地球創成後の時間。

phonon 伝導部分 K_P に加えて輻射伝導部分 K_r があるが、マントルを構成する珪酸塩鉱物については、 1200°C 程度以上で K_r が大きく利いてくるのではないかというのである。

Clark (1957) によれば、 K_r は近似的に

$$K_r = \frac{16}{3} \frac{n^2 \sigma T^3}{\epsilon} \quad (2)$$

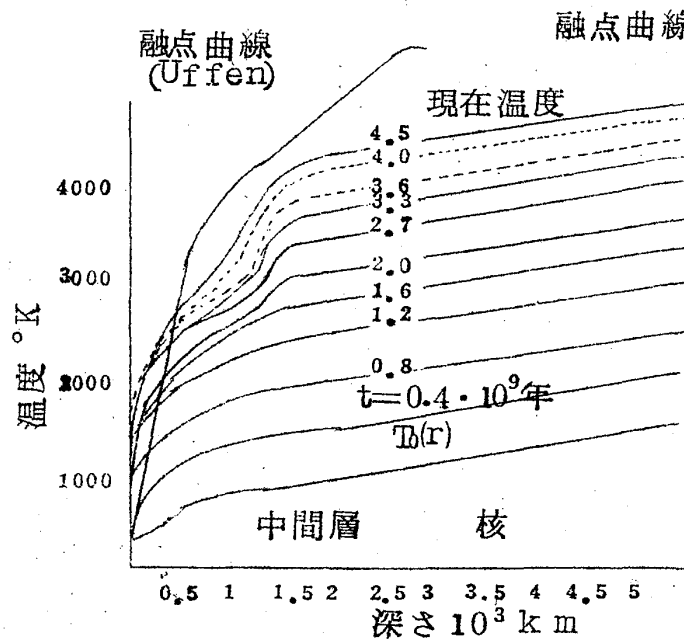
上田誠也

(n : 屈折率 ϵ : 不透明度 (opacity), σ : Stefan-Boltzmann 常数) と表わされた。即ち、従来の T に略逆比例する K_p と共に、 K は

$$K = K_p + K_r = \frac{R}{T} + R'T^3 \quad (3)$$

となる。但し n や ϵ は (T, P, C 及び波長) の関数である。

低温説にのつとり、隕石物質が accret して、homogeneous な地球が 30 ~ 45 億年前に生れたとして、上記(3)の K を用いて、熱的歴史を詳しく計算することは Lyubimova (1958) や、Mac Donald (1959) によって行われた。

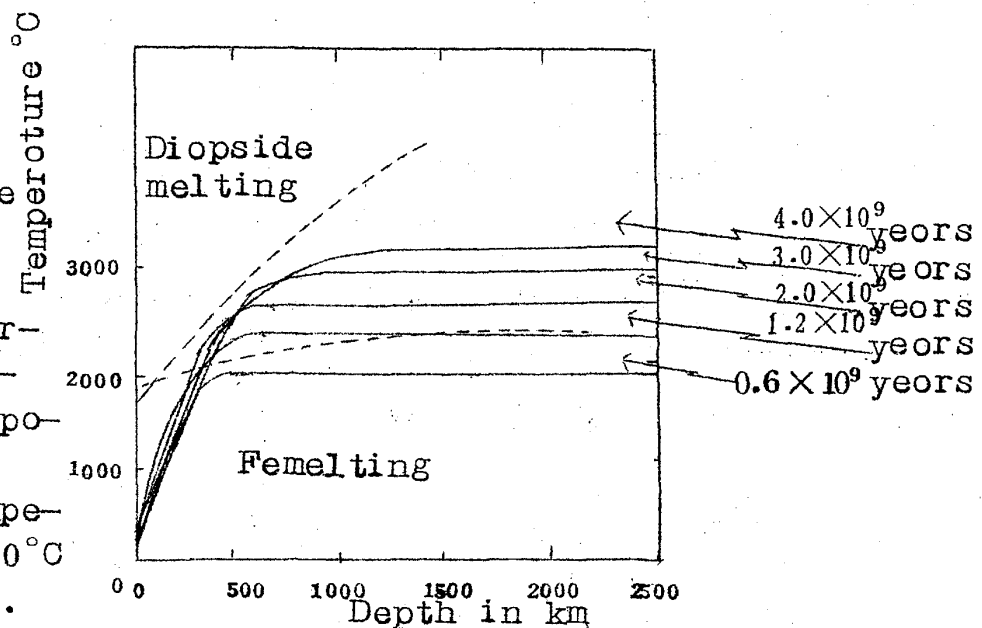


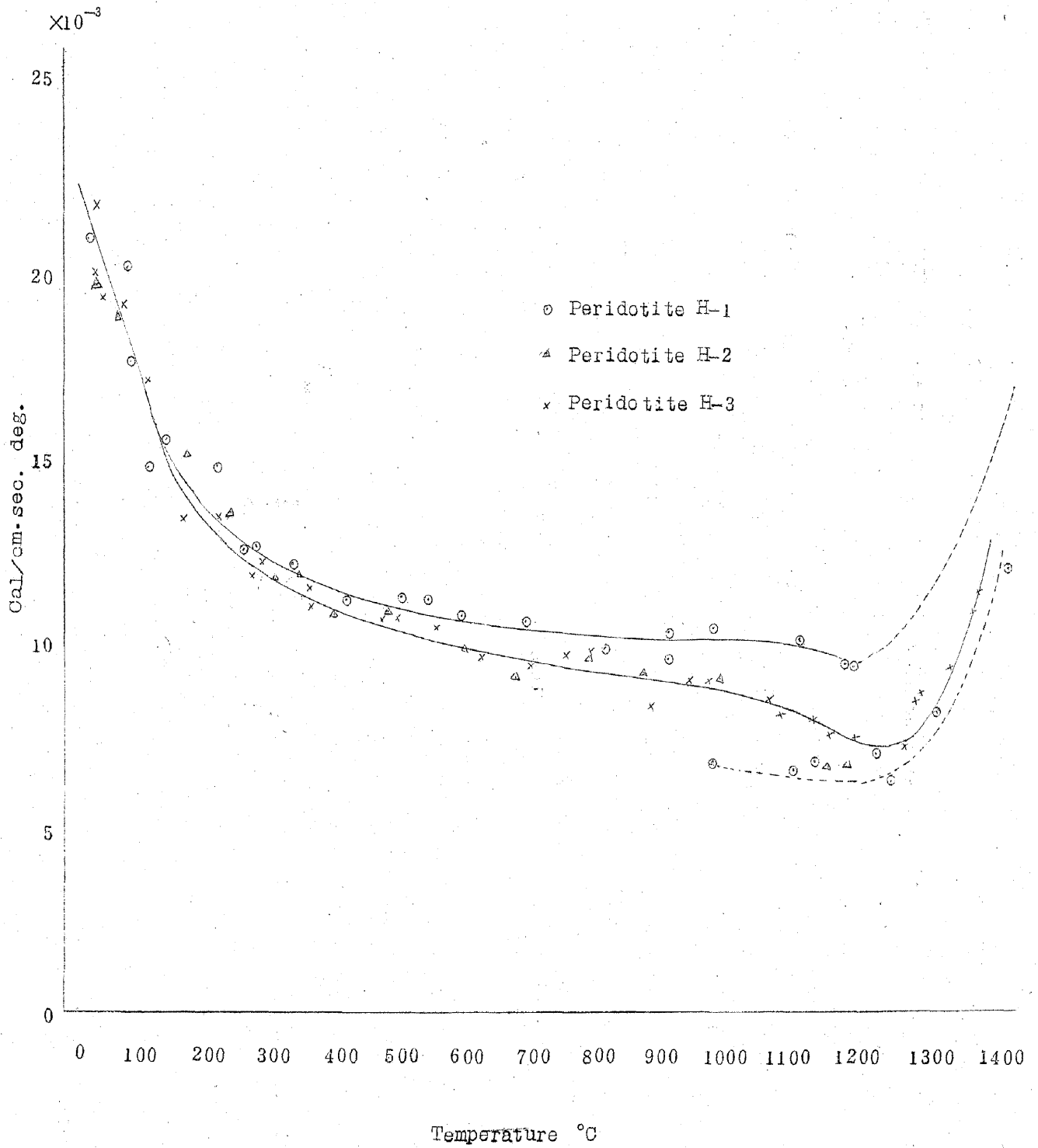
第 6 図

Luubimova による
Thermal history
(数値は地球創生後の
の時間)

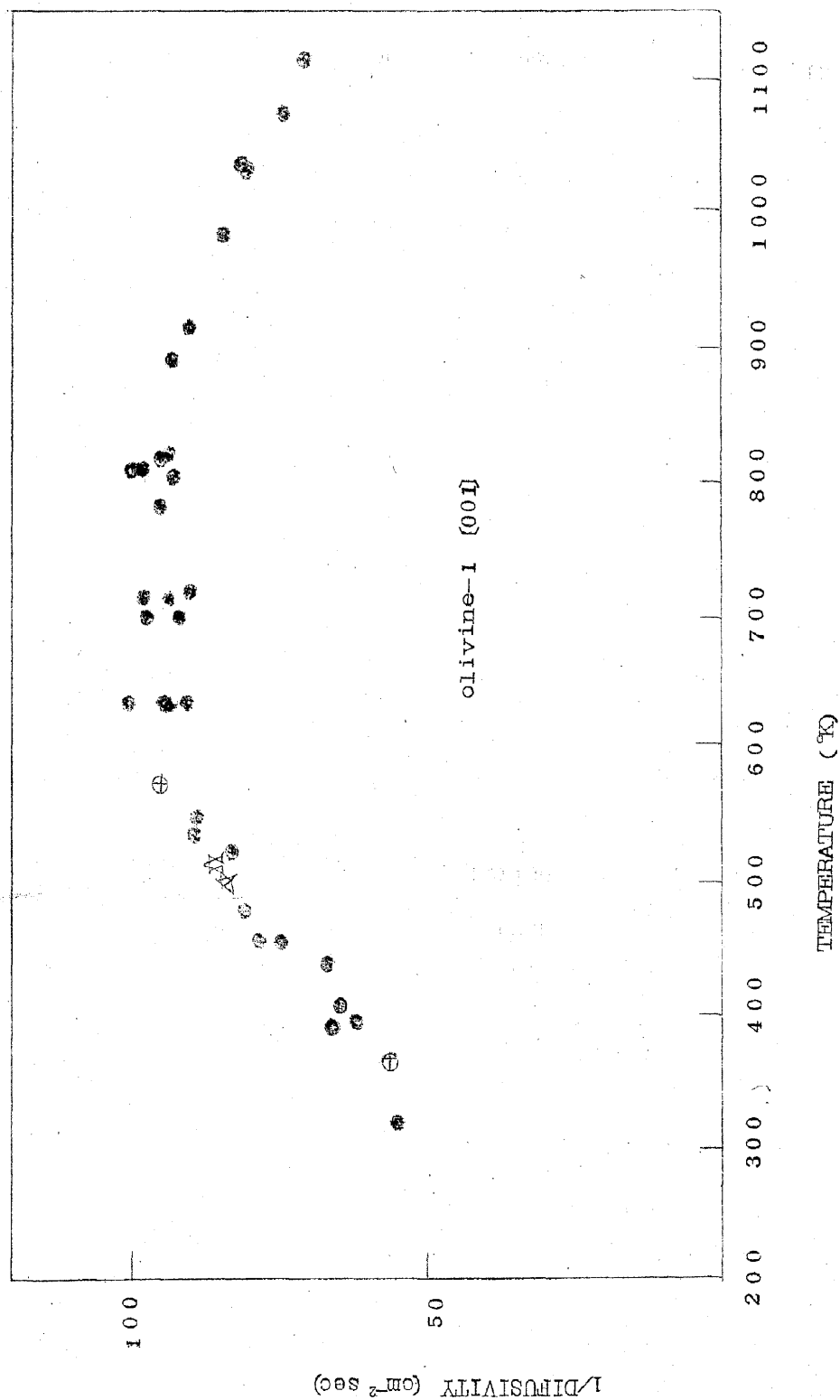
第 7 図

Temperature
variation
in a homo-
geneous ear-
th of chon-
dritic compo-
sition.
Initial tempe-
rature 1300°C
(MacDonald.
による)





第8図 Peridotite の熱伝導度の温度変化 (川田による)。



第9図 Olivine [001] 方向の thermal diffusivity の温度変化 (金森、水谷、藤中による)。

第6図、第7図は、その典型的な例である。accretion process による温度上昇や、現在は全く存在しない短寿命放射性元素による温度上昇などは、初期温度などを左右する重要な factor であるが、それについては、あまり深い考察は払われなかった。

これらの結果が、示唆する重要な点は、地球は次第に暖まるが、 K の温度依存性のために、深部の $4T/4z$ は、小さく、高温状態が上部マントルまで達し、そこで、鉄や珪酸塩の融点に先ず接近するということ。そして、その時間は、地球創生後、約10億年であるということであろう。(上部マントルが高温になり、融点に近づくということは、マントル低速度層と関連していると考えられるかもしれない。)このような事態が発生すれば、上部マントルでは、鉄はとけ、沈降を開始し、核の形成が始まる可能性がある。同時に原始地殻の形成、及びそれに伴う熱源の上部集中も起り得るであろうと考えられる。この種の物質の移動は、もはや、 $v=0$ の仮定を許さず、又、 c 、 ρ 、 K 、 A 等の成分依存性も必要となってくる。特に、potential energy の放出による発熱は相当大きい。MacDonald 等の計算では、このような分化作用の過程は詳しく取扱われていないが、成層構造形成後の歴史は、熱源がマントル上部及び地殻内に集中したモデルによつて計算が進められている。MacDonald によれば、層分離直後の温度が、珪酸塩の融点分布迄上昇した potential energy の放出により一と仮定すると、現在の地球にまで冷えるのは困難であるとしている。ここでも「冷える困難」が再確認された。

ここで今迄仮定されてきた $v=0$ の仮定が問題となる。 $v \neq 0$ 即ち、マントル内に流れ(例えば熱対流)があれば、熱伝導は大いに、さかんになり、「冷える困難」がのぞかれ得るからである。マントル内対流説は、古くから、造山作用、大陸移動等の説明として、しばしば主張されてきている仮説である。

$v \neq 0$ とすると、 v 自体についての運動方程式が(1)式に連立されねばならないが、マントル物質の粘弾性的性質には不明の点が多いので、運動方程式自体が、はつきりしない。Newton 流体として扱うことは、従来も行われてきたが、いくつかの試みは現在筆者等も行っている。究極的には、 P 、 T 、 C に依存する粘弾性体、或は plastic 物体として扱わねばならないであろう。

上田誠也

「冷える困難」がここ10年ばかりあまりに強調されたためか、最近の thermal history 論では、いかにして、全体がとけることなしに、成層構造が生れ得たかという問題に興味の焦点が集められてきた観がある。固体、内至は大きな粘性率をもつマントルの中を、とけた鉄が、沈下する問題がそれであつて、いろいろの speculation が行われている。

しかし、一度、全体がとけてしまったと考えれば、成層構造の形成は、より容易、且自然は行われるであろうことは疑う余地がない。とけた地球がうまく冷えてくれるか否か、という問題において、もう一度、再度検討の価値がある問題としては、対流説の問題としては、対流説の他にも、 K のふるまいがある。 K については、輻射熱伝導度 K_r が重要なことは先に述べたが、その値の見積りは、簡単な近似式(2)に乏しい吸収スペクトルのデータを入れて得られたものである。実際の計算では、 K の値については、1000, 100, 10cm^{-1} といった order が代入されてきたに過ぎない。一方、実験は、超塩基性岩の K について、東大地震研の川田や、東大理学部金森、水谷、藤井等によつて行われているが、第8図、第9図にみられるように K_r の重要性が、みられはじめる温度に、漸く達した所である。更に Lyubimova (1962) らによれば、excitation による K こそが高温では主要な働きをするという。

このような事情なので、 $K(P, T)$ についての現在の知識は、極めて不十分だと云わねばならない。

では、一度とけた地球を30~40億年のうちに冷やすにはどの程度の K であればよいだろうか。 $t \sim a^2/K\rho$ において、 $t < 10^9$ 年とするには、 $K > 0.3$ Cal/cm sec deg である要がある。このような K は、Brass とか鉛のそれ程度であるが、珪酸塩鉱物、或はその高压分解相が高温高压下で、この程度の K をもたないという保証はない。このような考えから、 K の方をパラメータとして、とけた地球を冷やす thermal history の計算が、今、筆者らの所で試みられている。とけた地球では、放射能の上部集中が起つている筈であるから、冷えるには都合がよい。

うまく冷える程、 K が大きければ、そもそもとける迄の heating が可能であつたかが問題とされよう。それには初期の heating (後述) や放射能の均

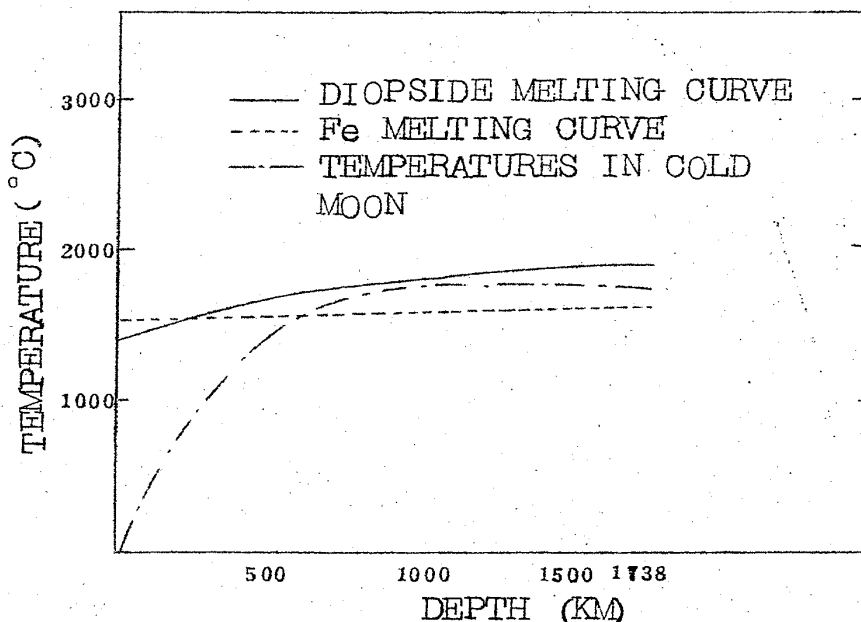
一分布が可能性を与えるが、更に次のようなことも可能ではないだろうか？即ち、形成したばかりの地球は dust の集合であるから opacity が高いので Kr が小さく、一度とけて再結晶すれば opacity が著しく減少し、Kr が大きくなるということである。

更に、問題を掘下げて、大陸下と大洋下のマントルに差のあるモデルー即ち、式(1)中で球対称性をもはや仮定しない場合—についても MacDonald (1963) 等は詳しい計算を行つた。それは前述の地殻熱流量の観測結果や、造山作用の機構を説明するためのものであるが、本稿の主題からは、やや話がこまかくなりすぎるかもしれないので省略する。

7 諸内惑星の thermal history

地球に apply されたのと、同じ方法で、地球以外の内惑星の thermal history を計算することは、形式的には、容易である。MacDonald (1963) がそれを行つた結果を以下に要約してみよう。

[月] chondrite を始源物質、 $T(r, 0) = 0^{\circ}\text{C}$ を仮定した場合の45億年後（つまり現在）の月内部温度は、第10図のようになる。月は小さいので、内部の圧力は低い（中心で46K bar 程度）。従つて、融点の上昇はすくない。このため、 0°C から出発しても、温度は融点と同じ位になっている筈となる。



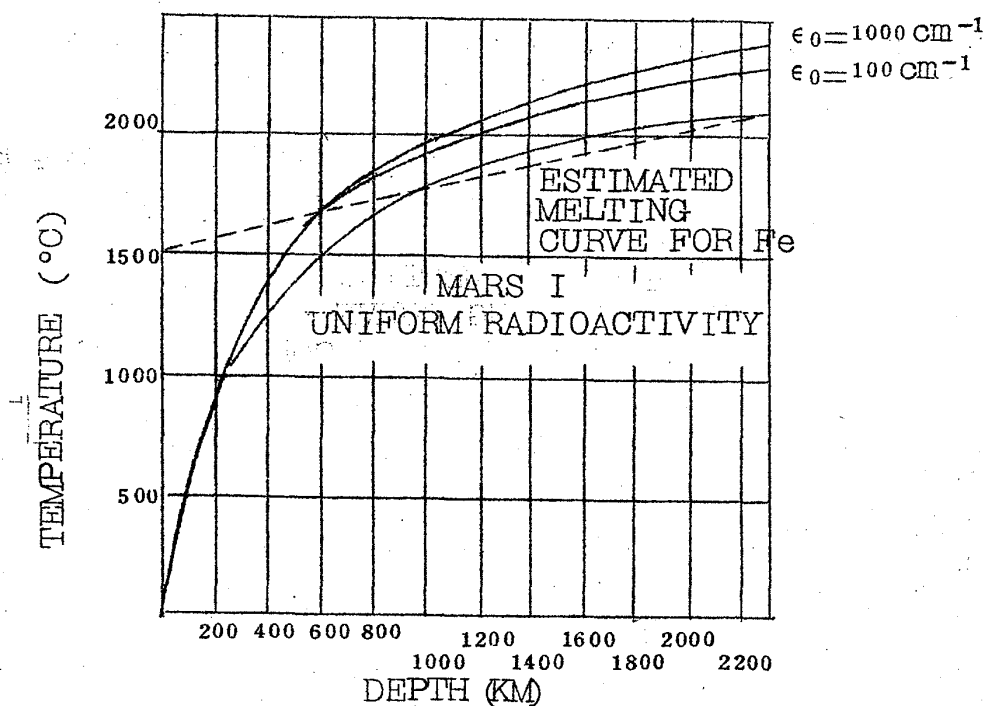
第10図 The variation of temperature in a moon having the chondritic radioactivity uniformly distributed. Initial temperature is 0°C (MacDonaldによる)

上田誠也

一方、月の形は、静水圧平衡よりも大きい扁平度をもっているので、現在は"固い"筈だといわれる。平均密度は 3.4 g/cm^3 であつて chondrite のそれより小さい。これらの点から、月は chondrite より ρ が小さく、且つ熱源のすくない物質からできたという可能性が生れる。

ρ の問題はさておき、温度に関する限り、筆者としては、地球と同様、かつて一度だけ放射性熱源が表層近くに集中し、現在は全体としては、相当冷えてしまつたのかもしれないという可能性を見逃すことはできない。月の自転周期と公転周期が等しいことは、dissipative な性質を示している。一部に伝えられる月での火山活動なども、この考えでは、立派な可能性をもつであろう。月はその平均密度及び慣性能率の推定値からみると、内部の方が ρ が小さいという奇妙な状態を呈していて不明の点が多い。

〔火 星〕 半径 = 3300km, $\rho \sim 4 \text{ g/cm}^3$ と推定されるが、半径は測定する光の波長によつて異なり、数 10km 程度の不定を示す。chondrite モデルをとり、表面で -40°C 、中心で 900°C という $T(r,0)$ を初期条件とすると、オ 11 図のような現在温度が得られる。



オ11図 Calculated temperature distribution of Mars assuming uniform chondritic radioactivity.

Pが小さいので、融点の上昇はすくなく、大部分の場所で鉄の融点を越えるので、鉄核の生成の可能性はある。しかし、そうすると、質量、や慣性能率の観測値に合う密度分布は不当に小さい表面密度を要求する。これにこだわるならば、chondrite よりも、放射性熱源の小さい始源物質から出発するか、より大きなKを仮定して核の生成をくいとめる必要があるかも知れない。

〔金星〕自転周期がおそく、公転周期（240日）とほぼ等しい。このことは、太陽に近いためもあるが、金星内部がdissipativeであることを示している。それは、内部温度が、融点に近ければ実現されよう。金星は地球と略等しいサイズであるから、chondrite モデルを採用すれば、地球とほぼ同じ thermal history をたどつたことになる。但し、太陽に近いので、表面温度は 600°K 程度であり、内部温度全体は、地球の表面温度 273°K との差だけ、高温側に平行移動すると考えてよい。従つて、ほとんど全面的に融点程度の内部温度をもつという可能性はある。つまり、金属核の存在が予想される。マリナー二号は金星に磁場の存在を認めなかつたが、この事実は興味深い。

〔水星〕水星も自転速度が小さい。則ち内部はdissipativeであろうと推察される。水星は異常に大きな平均密度（ $\rho = 5.46$ ）をもっているから、chondrite モデルは成立ちそうもない。主として金属相であろうと思われる。始源物質として何を考えてよいかよく分らないが、内部圧力が小さいであろうことから考えると、chondrite の $1/3$ 程度の放射性熱源をもつて出発しても、鉄の融点を越えている可能性はある。

8. 生成過程での thermal history

今迄、述べてきた thermal history では、或る時期に、地球なら地球が、現在のサイズになつたとして、そこから計算を出発させた。低温物質が、低温で集つたと考えれば、この仮定で良いのだが、実は生成過程で既にかなりの heating が行なわれたかもしれない。

太陽系起源論は、今の所、あまりに不備であつて、definite な取扱いには意味がすくないというので、このあたりの取扱いは、敬遠されてきた観がある。

しかし、今や、thermal history について可成り、詳細にわたつてものをいう必要が生じて来た。そうすると、生成過程の問題を放置しておくわけには

いかな。この方面の研究では、島津康男(1963)の試みがある。以下にそれをまとめよう。

本研究会で論議された様に、銀河系内での核種生成のプロセスが終つて、何年か後に、宇宙物質は固体粒となり、planetesimal となつた。それが、何等かのプロセスで accret して地球等の惑星が生れた。chondrite についていえば、核種生成終了から、chondrite がガスを retain する段階までの時間は、 X_e^{129} 時計の研究から $1 \sim 2 \times 10^8$ 年程度とされている (Anders, 1962)。一方、chondrite の年令は 45 億年、地球の年令 (この決定法は、本質的に chondrite の年令自体に depend しているが) も 45 億年とされること等から、chondrite の母天体の生成と地球の生成とが、略同じ time table に従つて起つたと考えることにしよう。つまり、核種生成後、地球生成までの時間も $1 \sim 2 \times 10^8$ 年程度ということになる。この時間は、それ以前に 10^{10} 年も続いたとされる核種生成期や、いわゆる、地球の年令 4.5×10^9 年に比べると著しく短いといわねばならない。若し、上述のことが正しければ、核種生成の際に生れた可能性のある短寿命放射性元素の一部はまだ生き残つており、生成途上の地球を heat up したことであろう。所謂 extinct radio nuclides の効果である。extinct radio nuclide の量については、実験的根拠は極めて乏しいが、島津は Kohman (1961) らの推定値によつて Fe^{60} , C^{36} , Al^{26} 等が相当量存在したとした。extinct radio nuclide の多寡は、地球の原始状態に対して、極めて、重要な factor であることは、間違いないので、何とかして、この量についてより多くの情報を得ることが望ましい。

次に accretion process での gravitational potential energy (G P E) の放出による heating を考えねばならない。若し、すべての GPE ($= -2.48 \times 10^{39}$ erg, Beck による) が、地球を heat up するのに用いられたとすると、温度上昇は 10^{40} K 程度の莫大なものとなる。もちろん、成長しつつある地球表面への衝突によつて release される energy の一部は、空間に、radiate されるから、実際の heating は成長速度に依存する。表面での放射平衡を仮定すれば、表面温度 T_R をきめる式は

$$\left(\frac{GM}{R} + \frac{V^2}{2} \right) \frac{dM}{dt} = 4\pi R^2 S (T_R^4 - T_S^4) \quad (4)$$

(G : 引力定数、 V : 粒子速度、 M : 成長地球の質量、 R : その半径、 S : Stefan Boltzmann 定数、 T_s : 空間の温度) となる。又、表面が熱的 insulator で、且、種々の化学反応が起るとすれば (4) 式の右辺は

$$= 4\pi R^2 \left(\rho c \frac{dT_s}{dt} - \rho \Delta h J \right) \quad (5)$$

(Δh 反応熱、 J 反応速度) となる。

いづれにしても、表面温度は、成長速度 $\frac{dM}{dt}$ に支配されるが、これについては、accretion process 自体のモデルが必要である。これが又、実によくわかっていない。

現在までに、proposed されている accretion process には、次の二つの考えがある。

1) Kuiper - Weizsäcker モデル (K-W モデル)

planetary cloud が先づ gas 及び dust からなる proto-planets になり、proto-planet は急速に収縮して planet となる。この過程は、急激な重力収縮を行うので、高温となることが期待される。

2) Schmidt - Safronov モデル (S-S モデル)

成長する地球に向って、微小粒子が徐々に集積する。従って、温度は GPE によってはあまり上らないであろう。

事実、このようなモデルで半径及び表面温度 (4 (式) の場合) を時間の関数として計算してみると、第 12 図、第 13 図のようになった。図中の θ は、

$$V = \sqrt{\frac{GM}{\theta R}} \quad (6)$$

によって定義される accretion process に関するパラメーターである。第 12 図からみられるように、S-S モデルでは 1×10^8 年位で地球の大きさは終局値に近づくし、K-W モデルでは、同程度の時間で、爆発的増大の段階に到達する。後者の場合には、集積する原料物質がなくなることによって、成長は終るわけである。

いづれの場合にも、地球の成長が、ほぼ、 10^8 年のオーダーで行われることは、前述の $X_e^{129} \text{ age}$ と比べて、興味深い。

表面温度の方は、第13図のように、W-Kモデルでは、予期した通り、最終段階で急上昇するし、S-Sモデルでは 100° 位しか上らないことになる。

以上では、生成過程における放射性発熱は考慮されていない。生成する地球の内部温度の時間変化を求めるには、それ、特に extinct radio nuclides のそれが重要な factor となる。断熱圧縮や、長寿命放射能による効果の見積りは、比較的簡単であり、温度上昇は数百度程であって、余り重要ではない。

問題は(1)を生成途上の地球に apply することになる。生成速度は、S-Sモデル、K-Wモデルから各々得られるものを用い、extinct radio nuclidesの量については、Kohmanらの値を用いる。

第14図、第15図は計算結果の例であるが、S-Sモデルでは中心温度は当初に 8000°K 程度に達するが地球が成長しきった時には、 2000°K 程度まで下がる。一方、K-Wモデルでは最終段階の表面温度急上昇のため、温度分布は、途中に谷のある形となる。島津は、このような温度分布は realistic でないとした。

さて、これらの計算結果は、採用した constants の値によって、大巾に変化し得るものだし、モデル自体も可成りあやふやともいえる。しかし、若し、extinct radio nuclides による発熱が利くものならば、地球中心部の温度は、仮に低温物質の集りとして出発しても、成長過程のうちに一しかも、初期に一高温に達してしまい、essential には、高温起源説と同じことになってしまうことになる。

このように考えると、例えば核-マントルといった、成層構造が生れるのも、地球史のごく初期ということになる。核の生成は、若し、地球物質にはじめから金属鉄相が、存在すれば、融解潜熱の消費のみによって沈降がはじまるが、鉄が酸化物の形をとっていたとすれば、還元反応の energy も必要となる。しかし、一度、核生成作用がはじまれば、GPEの放出は十分の energy を供給するので process は加速されることになるう。

accretion process と extinct radionuclides が二つの重要な factor であることは上述の通りである。筆者の考えでは、chondrite モデルをとるならば、chondrite の研究から、その母天体のサイズや温度を推定することによって、この二つの factors について或る程度の限定条件が得られる

筈である。その上で、その条件を地球に apply してみてもどうかと思う。

9. むすび

地球の thermal history も漸く、総合的な取扱が可能、且必要になってきつつある。今迄の研究は、それぞれ、或る側面をとらえてはいるが、とても、総合的な歴史を明かにするものとはいえない。

更に、この種の考察を進めるには、宇宙化学や宇宙論からの授けが、本質的に必要である。

文 献

教科書的な事柄については、岩波全書「地球物理学」坪井忠二編（1966年4月刊行予定）が手頃であろう。

Anders, E., Meteorites and early history of solar system,

Ed. R. Jastrov and A. G. W. Cameron, Academic Press. (1962)

Clark, S. P., Radiative transfer in the Earth's mantle,

Trans. Amer. Geophys. Union, 38, 931-938. (1957)

Cox, A. V., Doell, R. R. and G. B. Dalrymple, Reversals of the

Earth's Magnetic Field, Science, 144, 1537-1543, (1964)

J. A. Jacobs, The Earth's Interior, in Handbuch der Physik,

47, 364, Springer, (1957)

Kohman, J. P., Chronology of nucleosynthesis and extinct

natural radioactivity, J. Chem. Education, 38, 73-82 (1961)

Kormer, S. B. and A. I. Funtikov, Izv. Earth. Phys. Ser., No. 5.

USSR (1965)

Lee, W. H. K. and S. Uyeda, Review of heat flow data, Chapter 6,

in Terrestrial heat flow, Geophysical Monograph No. 8,

American Geophysical Union, (1965)

Lyubimova, E. A., Thermal history of the earth with con-

sideration of the variable conductivity of the mantle,

Geophys. J., Roy. Astron. Soc., London, 1, 115-135, (1958)

Lyubimova, E. A., Heat transfer by excitons in the earth's mantle, in Problems of Theoretical Seismology and Physics of the Earth's Interior, Akad. Nauk. USSR (1960)

MacDonald, G. J. F., Deep structure of continents, Rev. of Geophys., 1, 587-665, (1963)

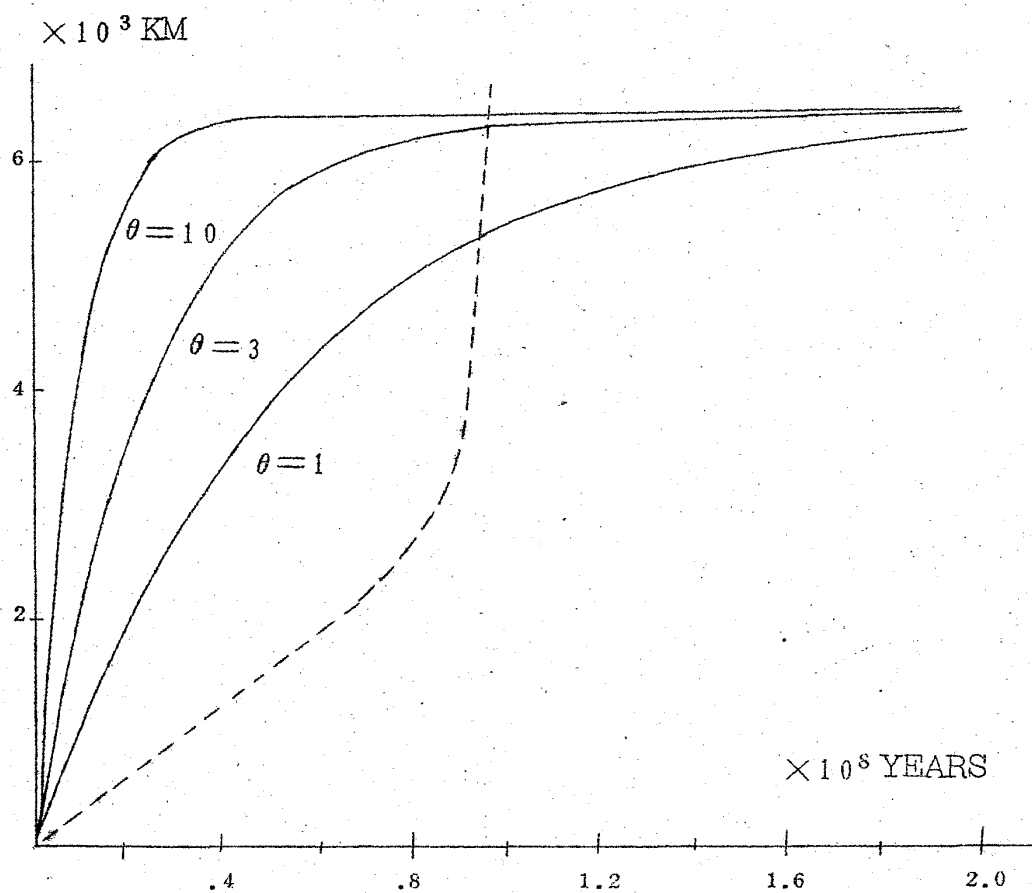
MacDonald, G. J. F., The internal constitutions of the inner planets and the moon, Space Science Reviews, 2, 473-557 (1963)

Malkus, W. V. R., Precessional Torques as the Cause of Geomagnetism, J. Geophys. Res., 68, 2871-2886 (1963)

Shimazu, Y., Thermodynamical aspects of terrestrial evolution, J. Earth Sci., Nagoya Univ., 11, 28-48, (1963)

Urry, W. D., Significance of radioactivity in Geophysics, Thermal history of the Earth., Trans. Amer. Geophys. Union, 30, 171-180, (1949)

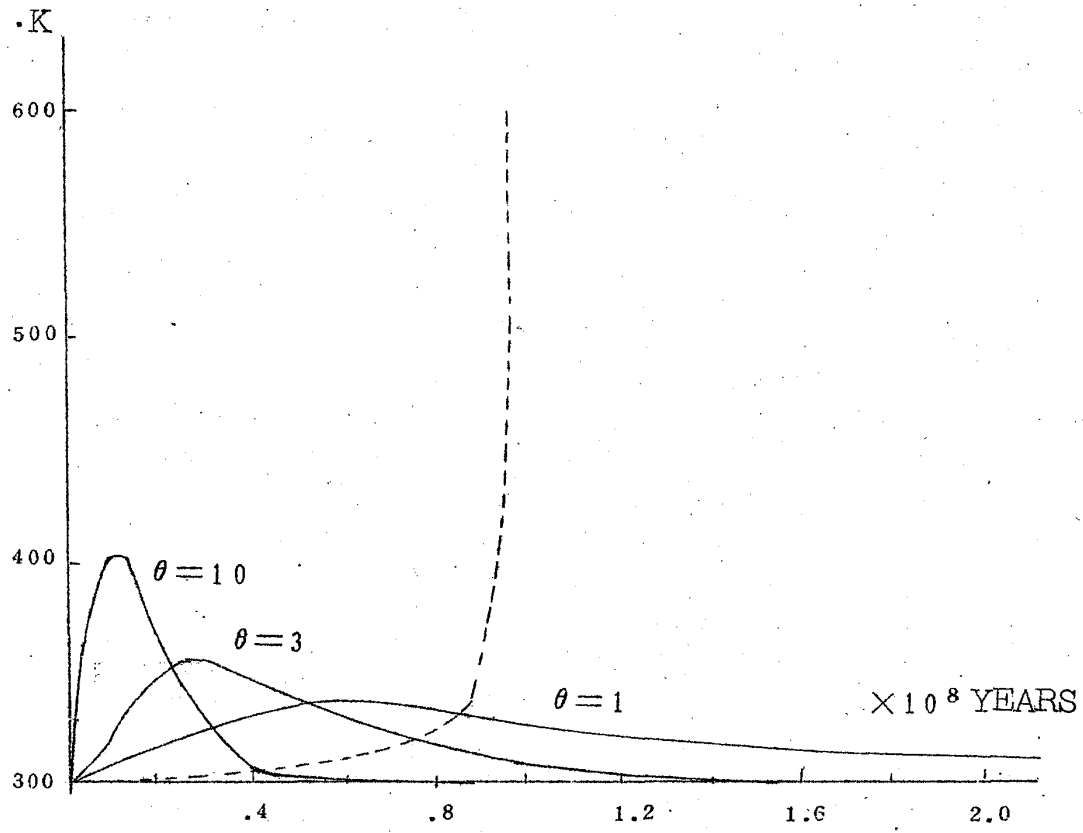
Verhoogen, J., Heat balance of the Earth's core, in the Earth Today, ed. by A. H. Cook and T. S. Gaskell, 276-281, Royal Astro. Soc., London, (1960)



第 1 2 図 地球の成長過程．縦軸：半径．横軸：時間（島津による）

—— S - S モデル

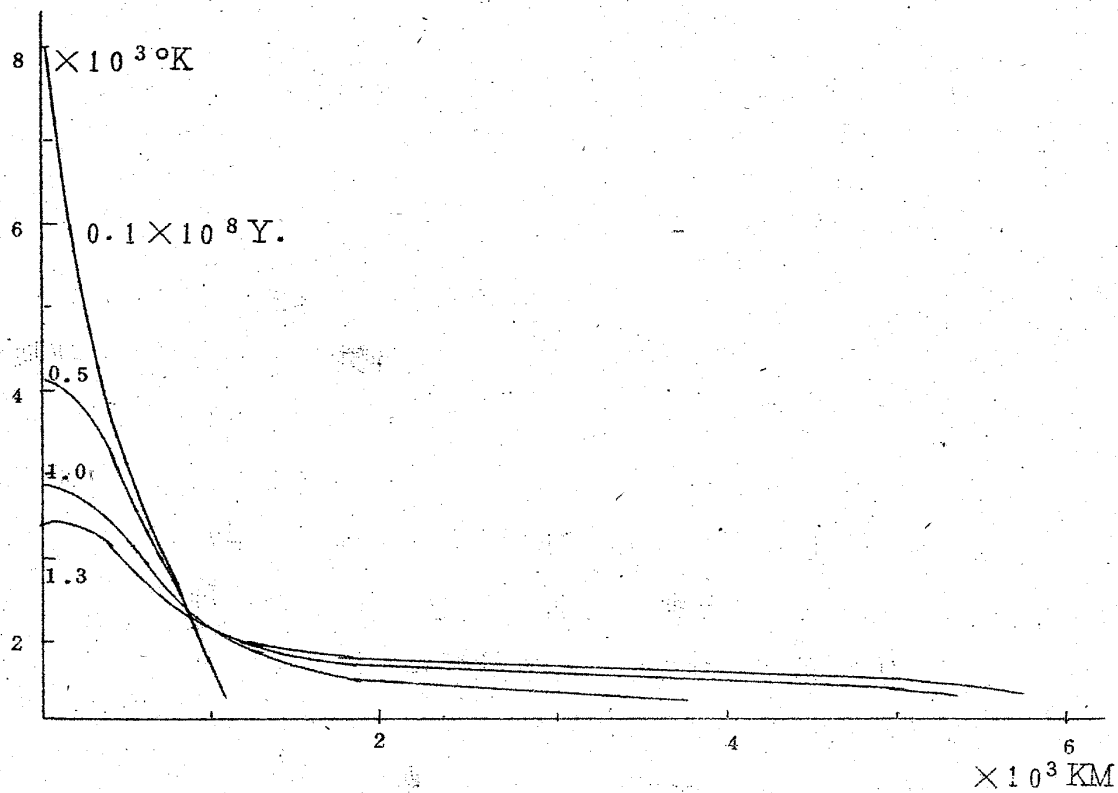
..... K - W モデル



第 1 3 図 accretion process における表面温度 (島津による)

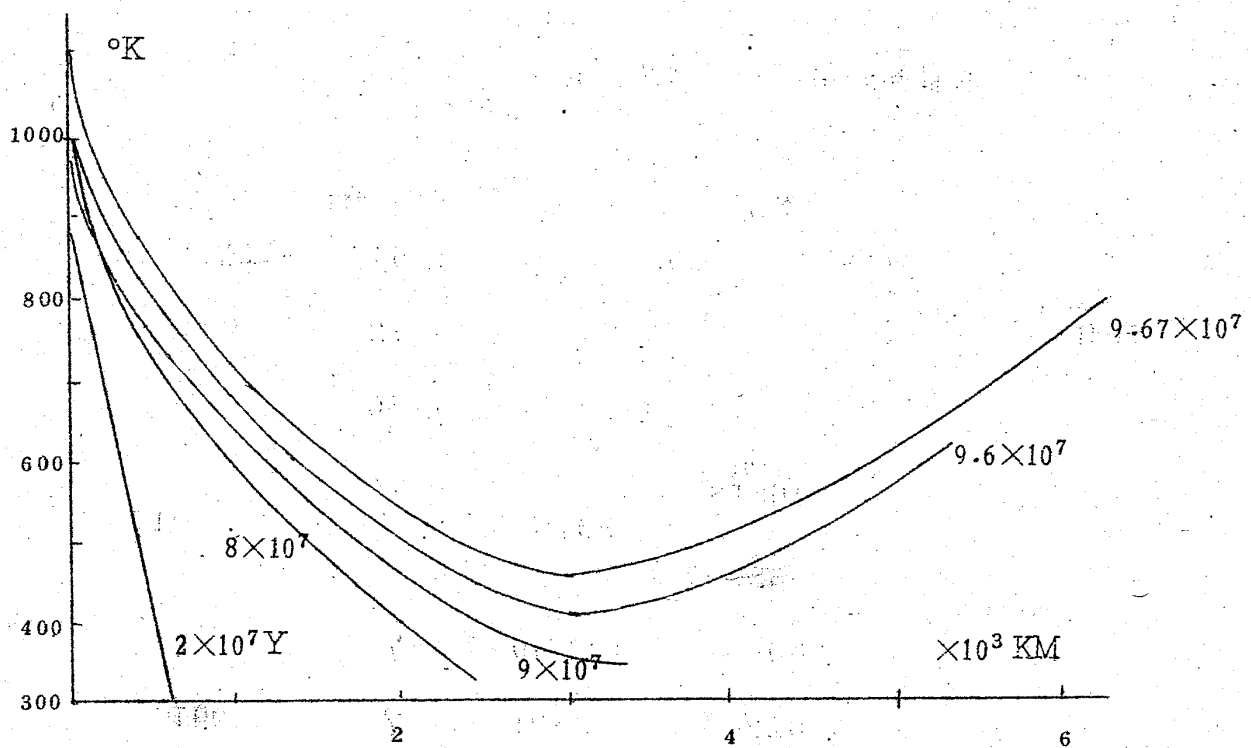
—— S - S モデル (放射平衡)

..... K - W モデル



第 1 4 図 成長途上の地球内部温度分布 (島津による)

S - S モデル, $\theta = 1$ の場合の例



第 1 5 図 成長途上の地球内部温度 (島津による)

K - W モデルの例